第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

南疆塔中-38团沙漠公路沿线风沙输移规律与防沙体系研究

马奔腾[1]，程建军[1]，雷加强[2]，丁泊淞[1]，高 丽[1]，安元锋[1]，郑智鹏[1]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：在建塔中-38团沙漠公路由塔克拉玛干沙漠腹地延伸至其东南缘，全程皆分布不同程度的风沙危害形式，对沙漠公路的建设、服役、养护等造成严重威胁。基于该地区的遥感影像解译及风况数据分析，揭示了沙漠公路沿线不同区段内的风沙环境特征和沙丘移动规律，在此基础上提出了相应的沙害防治体系框架。通过研究发现：（1）沙漠公路沿线区段盛行起沙风向为NE、ENE、E，起沙风频率由21.7%增长至33.8%，风向特征由锐双峰态势发展为钝双峰态势，风沙环境逐步恶劣；（2）沿线区段输沙势介于178.23~309.43 VU，风能环境为低至中等，合成输沙方向介于SW-WSW，风向变率为中等；（3）区段沙丘年平均移动速度在3.16~6.26 $m\cdot a^{-1}$之间，沙丘移动速度和方向存在明显空间差异，且部分区段沙丘移动方向与合成输沙方向一致性较差。基于以上沙漠公路区段环境特征，提出阻-固结合的沙漠公路防沙体系，对沙漠公路沙害的发展变化规律与公路的可持续研究具有实际应用价值。

关键词：沙漠公路；沙害治理；输沙势；沙丘移动

在建塔中-38团沙漠公路全长151 km，贯穿塔克拉玛干沙漠东南缘，为且末垦区"一主三辅"干线路网布局中"三辅"的重要组成部分。塔克拉玛干沙漠为世界第二大流动沙漠，内部广泛分布着高大沙丘，沙源极为丰富，沙丘丘体由松散堆积的粉砂、细砂风积物组成。沿线风沙活动频繁，风力强劲，该公路途径范围内存在中、低2种风能环境[1-2]，风是决定沙漠地表形态的主要动力，同时也是引起沙害的直接因素[3-5]，沙漠公路全程中等、严重风沙危害程度总占比为56.9%，主要风沙危害形式为沙埋路面和风蚀路基，强烈的风沙活动对该条线路的建设以及后续的安全通行、服役、养护等都带来极大技术挑战，亟需对沿线风沙环境特征进行研究并提出防治措施。

20世纪50年代，包兰铁路成为我国首个流动沙漠区道路风沙防治成功的案例，为沙漠区道路修筑与防护积累了经验，半个多世纪以来，众多学者对沙漠地区的沙丘移动[6-10]、风沙环境[11-12,2]、风沙防治措施[13-15]及防治效益等进行了深入的研究，为风沙危害的治理奠定了坚实的理论基础。蔡东旭等[16]通过对风沙环境、风沙危害定位的系统研究，按照阻沙-固沙-输沙工程复合防沙原则，建立了由机械、生物组成的防沙体系，基本达到风沙防治要求；张克存等[17]分析了乌玛公路沿线的风沙环境和沙害形式，提出"六带一体"的防沙体系来应对沿线风沙危害；Dong等[14]在研究中指出，芦苇、稻草固沙方格是最经济、最有效的固沙措施，多种沙障形成的防沙体系能有效地延长防护时间。防沙体系的建立关键在于掌握沙丘的移动规律，风作为沙丘移动的动力因素，必须考虑在内，有关沙丘移动与风沙环境特征的研究多使用固定气象站数据或短时间的野外观测数据进行分析，杨军怀等[6]、赛亚热·赛都拉等[18]利用气象站数据分别对库鲁克和库姆塔格沙漠的沙丘移动情况和风沙环境特征进行了分析，但受限于风况数据的完整性和气象站与研究区距离较远，未能很好地反映出研究区整体风沙环境

收稿日期：2022-01-26； **修订日期：**2022-05-09
基金项目：国家自然科学基金项目（52168065）；兵团重大科技计划项目（2020AA002）
作者简介：马奔腾（1997-），男，硕士研究生，研究方向为公路防沙. E-mail: 1409786063@qq.com
通讯作者：程建军. E-mail: chengdesign@126.com

特征。沙漠恶劣的自然条件严重制约了风况数据的收集工作，导致远离气象站区域内的沙丘移动时空差异性无法与风沙环境建立精准联系，对沙漠道路风沙危害的防治带来困难；也有学者采用气象站数据对近距离区域内沙丘进行监测分析。但是利用遥感影像数据分析不同区域沙丘移动速度和方向，并结合全范围风况数据分析特定区域风沙环境，从而提出针对性防治措施的系统研究较少。

本文以塔中-38团沙漠公路为研究对象，对沿线不同区段内沙丘移动速度、方向和风沙环境、风沙危害等进行监测，在掌握各区段风沙环境特征的情况下，设计合理的防沙体系框架，旨在确定沿线独特的风沙环境，为沙漠公路有针对性的设置防沙体系提供理论依据，对该沙漠公路的正常通车与其他沙漠地区的风沙防治提供重要的理论依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

塔中-38团沙漠公路为二级公路，全长151 km，从塔克拉玛干沙漠腹地塔中延伸至沙漠东南缘38团地区，整体呈NW-SE走向，基于该公路经行范围内卫星影像的更新频率及影像质量，沿线优选出8段研究区（图1）；沿线属典型的大陆性温带干旱气候，年均降水量不足25 mm，蒸发强烈且昼夜温差大，年平均气温10.5 ℃；根据实地勘测数据，公路所穿越地貌单元可划分为4种类型，即固定灌丛沙丘区（全线占比9.33%）、半固定沙丘区（占比7.58%）、复合型横向沙丘链区（占比37.53%）及高大复合型纵向沙垄区（占比45.56%）。勘测结果表明：沿线风沙危害类型主要为沙埋和风蚀2种，其中危害轻微段共65.40 km，严重段共72.03 km，主要位于复合型横向沙丘链区的链体段和高大复合型纵向沙垄区的垄体段；中等危害程度长14.33 km，主要位于复合型横向沙丘链区的链间平沙地区段和半固定沙丘区的丘体段。

1.2　数据来源

遥感影像数据主要来自Quickbird，空间分辨率为0.61 m，不同区域卫星影像时期各异，各研究区获取2个时期的卫星影像进行沙丘移动的分析，获取卫星影像信息如表1所示；风况资料为大气再分析全球气候数据ERA5，从ECMWF官网（https://cds.climate.copernicus.eu/）获取，时空分辨率分别为1 h和0.25°×0.25°，由于风是沙丘移动的动力因素，所以本文用与卫星影像同年份的ERA5数据进行处理分析。

1.3　研究方法

1.3.1　沙丘移动速度与方向　对影像进行几何校正来消除由影像错动带来的误差，几何校正后各控制

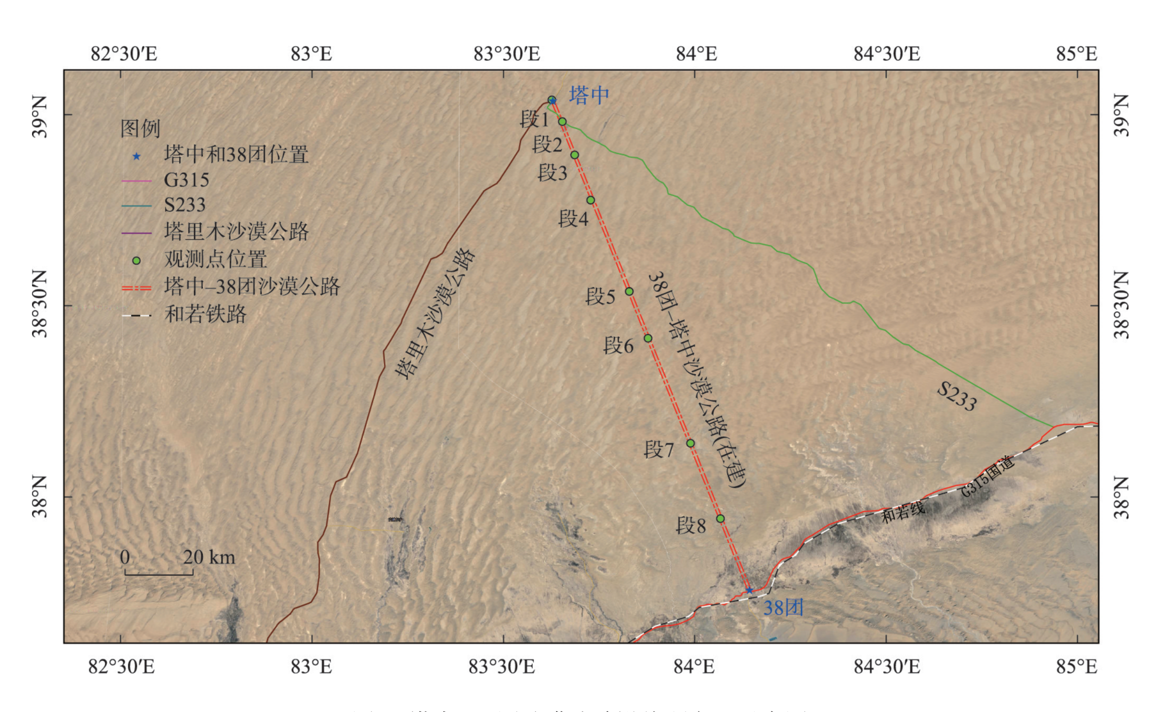


图1　塔中-38团沙漠公路沿线研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area along the Tazhong-38th Corp desert highway

表1　卫星影像信息

Tab. 1　Information of satellite images

研究区	影像日期	中心坐标	研究区	影像日期	中心坐标
段1	2013-03-17	83.63°E,39.04°N	段5	2007-04-29	83.87°E,38.53°N
	2016-03-03			2011-08-19	
段2	2013-03-17	83.66°E,38.98°N	段6	2007-04-29	83.87°E,38.41°N
	2016-03-03			2011-08-19	
段3	2016-03-02	83.66°E,38.89°N	段7	2011-08-19	83.95°E,38.16°N
	2019-08-19			2013-06-20	
段4	2007-04-29	83.72°E,38.78°N	段8	2010-12-08	84.02°E,37.97°N
	2012-09-27			2013-12-07	

点的总残差小于1像元,满足精度需求。采用手动数字化法提取出沙脊线[19],以沙脊线的移动作为沙丘移动的判断依据,采用5点平均法计算沙脊线的移动速度和方向,点位应沿脊线均匀分布且选择脊线明显特征处如迎风坡底、背风坡底等,本文按此原则选择图2所示5点;所选沙脊线的年平均移动速度总和与年份跨度的比值作为该研究区沙丘年平均移动速度,沙脊线上5点的角度平均值作为该沙丘的移动方向。

1.3.2　研究区风沙环境　利用ERA5数据计算出风速和风向,利用风速进一步计算出起沙风频率和输沙势(*DP*),*DP*计算公式为[20]:

$$DP = V^2(V - V_t)t$$

式中:*DP*为输沙势(VU);V、V_t分别为起沙风速和临界起沙风速(单位为节);t为起沙风时间,以起沙风小时数与总观测小时数的百分比表示;*DP*矢量求和得到合成输沙势(*RDP*)和合成输沙方向(*RDD*),*RDP/DP*为风向变率指数。根据Fyberger等[20]对风能环境的划分,*DP*>400 VU为高风能环境、200~400 VU为中风能环境、<200 VU为低风能环境;风向变率指数越大,表明该地区风向越稳定,反之越易变化。

为证明ERA5数据的适用性,选取塔中气象站2014—01—2016—10的数据与同时期ERA5数据进行起沙风频率和输沙势的计算,并分别对起沙风频率和输沙势进行比值分析,由图3可知,2种因素的比值分别在1上下轻微波动,表明ERA5数据在该地区适用性良好。

2　结果与分析

2.1　起沙风频率

起沙风是沙粒运动的动力因素,起沙风速是指沙粒开始脱离地面摩擦和重力约束开始运动时的临界风速,因此对起沙风的研究是设置防沙工程的重要依据。塔克拉玛干沙漠临界起沙风速为4~5 m·s^{-1}[2],本文采用其平均值4.5 m·s^{-1},8段研究区内起沙风频率介于21.7%~33.8%,段1~段8研究区起沙风频率呈上升趋势,起沙风主方向ENE出现较大

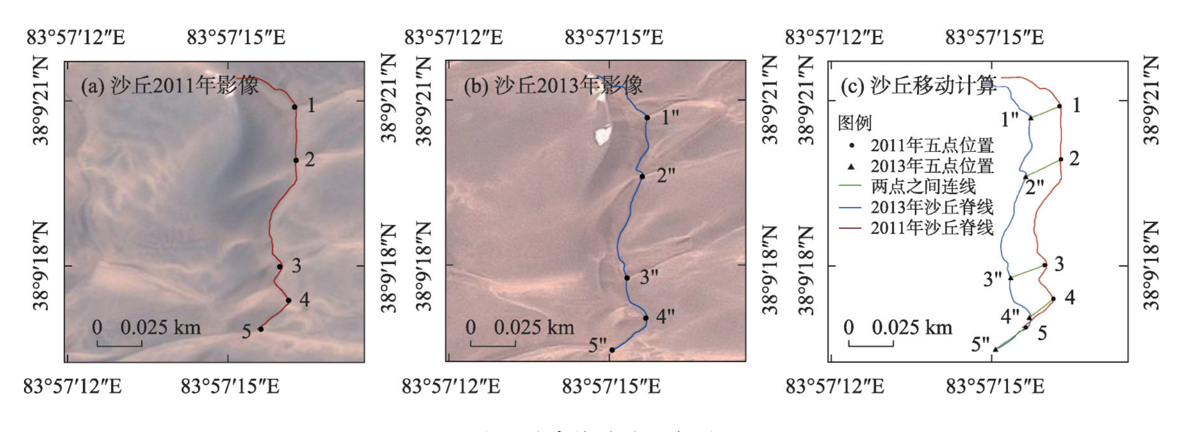


图2　沙脊线移动示意图

Fig. 2　Diagram of sand beamline movement

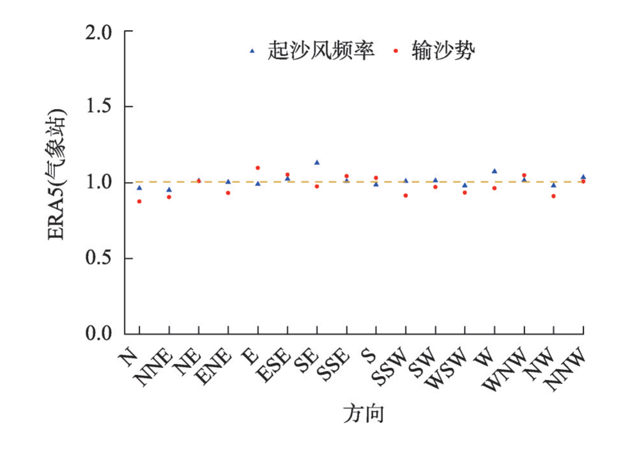


图3 多因素对比分析

Fig. 3 Multi-factor comparative analysis

增幅，频率介于7.5%~14.29%，NE、E方向的起沙风频率分别由2.62%、5.83%发展为8.37%、1.7%，NE方向起沙风频率超过E方向起沙风频率；按矢量求和法则计算得到合成起沙风向，段1~段8研究区合成起沙风向由WSW方向向S方向过渡，风向特征由锐双峰态势逐步发展为钝双峰态势。

图4表明，段1~段3研究区各方向起沙风频率变化一致，主导方向为ENE、E，最大频率分别为8.7%和5.6%，NNE、ESE起沙风频率次之；段4研究区ENE方向起沙风频率相对段1~段3研究区出现明显增幅，NNE、ESE频率相对降低。段5~段7研究区内起沙风频率向NE、ENE、E集中，频率最高为6.74%、14.3%和5.48%；在这3段研究区内，ENE起沙风频率依旧占比最大，且相对段4研究区有较大增幅，NE方向的频率增幅在3%左右，其余方向的频率相对段1~段4研究区普遍降低。段8研究区中，逆主风向WSW、SW起沙风频率陡增，最大达3%和2.9%，该研究区中ENE方向的起沙风小时频数为

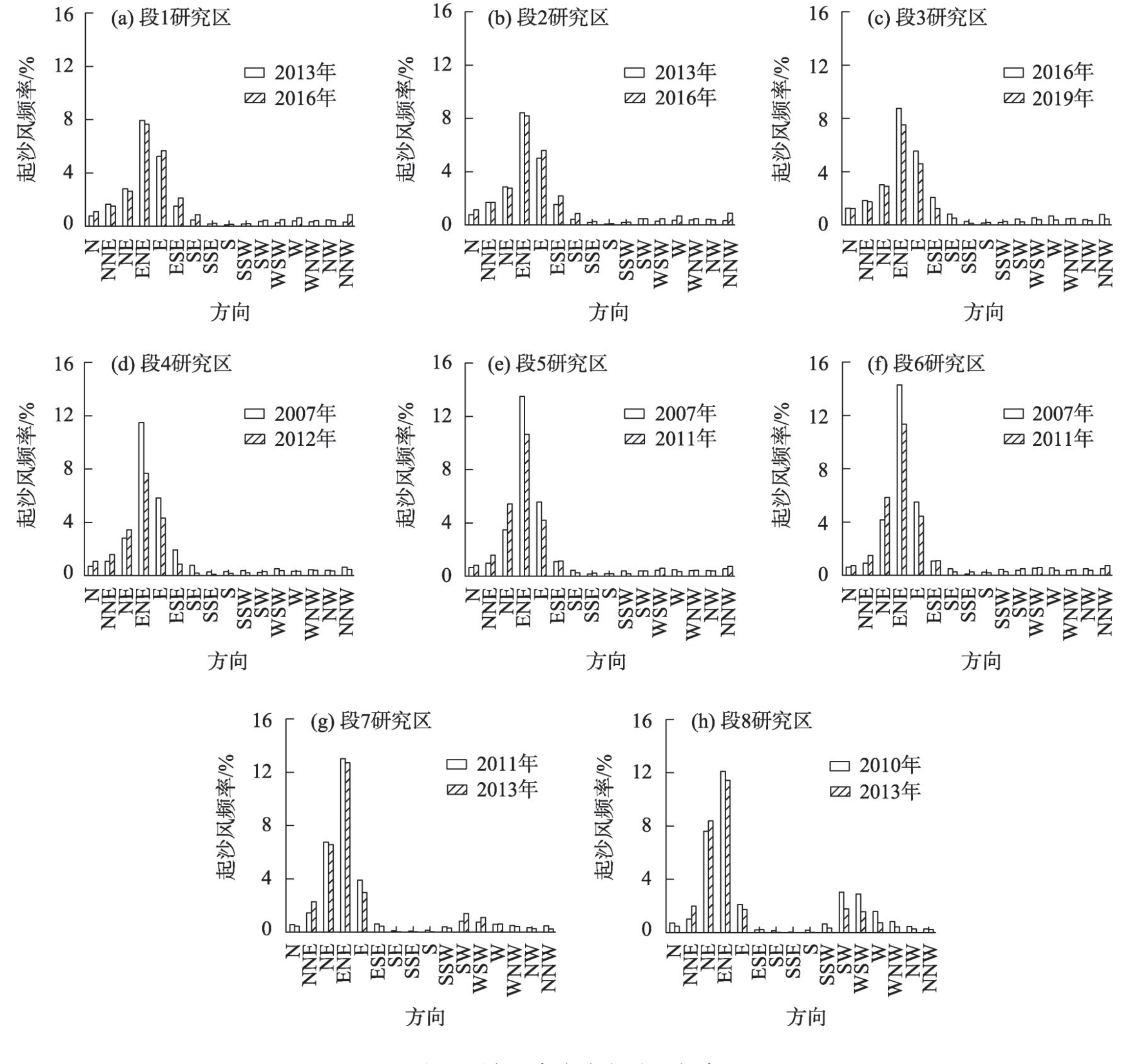


图4 研究区各方向起沙风频率

Fig. 4 Sand-driving wind frequency in the study area

1059, NE 为 667; WSW 频数 254, 为 ENE 方向的 24%;SW 频数 266,为 NE 方向的 40%,因此,该研究区下风侧沙丘极易发生逆向移动给公路带来破坏。

2.2 输沙势

研究区各方向 *DP* 与起沙风频率变化趋势表现出良好的一致性(图5),*DP* 主导方向为 NE、ENE、E,*RDD* 与盛行起沙风方向基本保持一致(表2)。段1~段4研究区 *DP* 主导方向为 ENE、E,段5~段8研究区 *DP* 主导方向转变为 NE、ENE。数据表明,段1~段8研究区内 *DP* 值在E方向大幅下降,逐渐失去主导地位;ENE方向 *DP* 稳步增长,并逐步表现出单一主导方向的趋势,公路上风侧风沙活动程度上升。段8研究区中由于逆主风向 WSW、SW 起沙风的存在,导致该段 *RDD* 和 *RDP* 与整体产生差异(表2),逆向 *DP* 的作用导致段8研究区2010年 *RDP* 仅为26.35 VU,*RDD* 为221°;2013年中逆主方向的 *DP* 相对较小,对 *RDP*、*RDD* 的影响也就小。

图5表明,段1~段3输沙主导方向为ENE、E,3处研究区的 *RDP*/*DP* 介于0.59~0.73之间,说明风向较稳定,E、ENE方向的起沙风对沙丘移动起主要作用;段4~段7研究区 ENE 方向 *DP* 急速增长,NE 的 *DP* 稳步提升,E方向 *DP* 迅速减小,输沙主导方向为 NE、ENE、E,并不断表现出 ENE 方向单一主导的趋势;段8研究区 SW 方向的 *DP* 有明显增幅,将对输沙活动产生较大影响;表2数据说明段1~段8研究区风能环境整体中等,*RDP*/*DP* 整体有变小趋势,说明段1~段8研究区的风向变化逐渐频繁,风况环境逐渐复杂,应注意公路的多方向防护。

2.3 沙丘移动特征

勘测结果表明,沙漠公路沿线地貌为高大复合

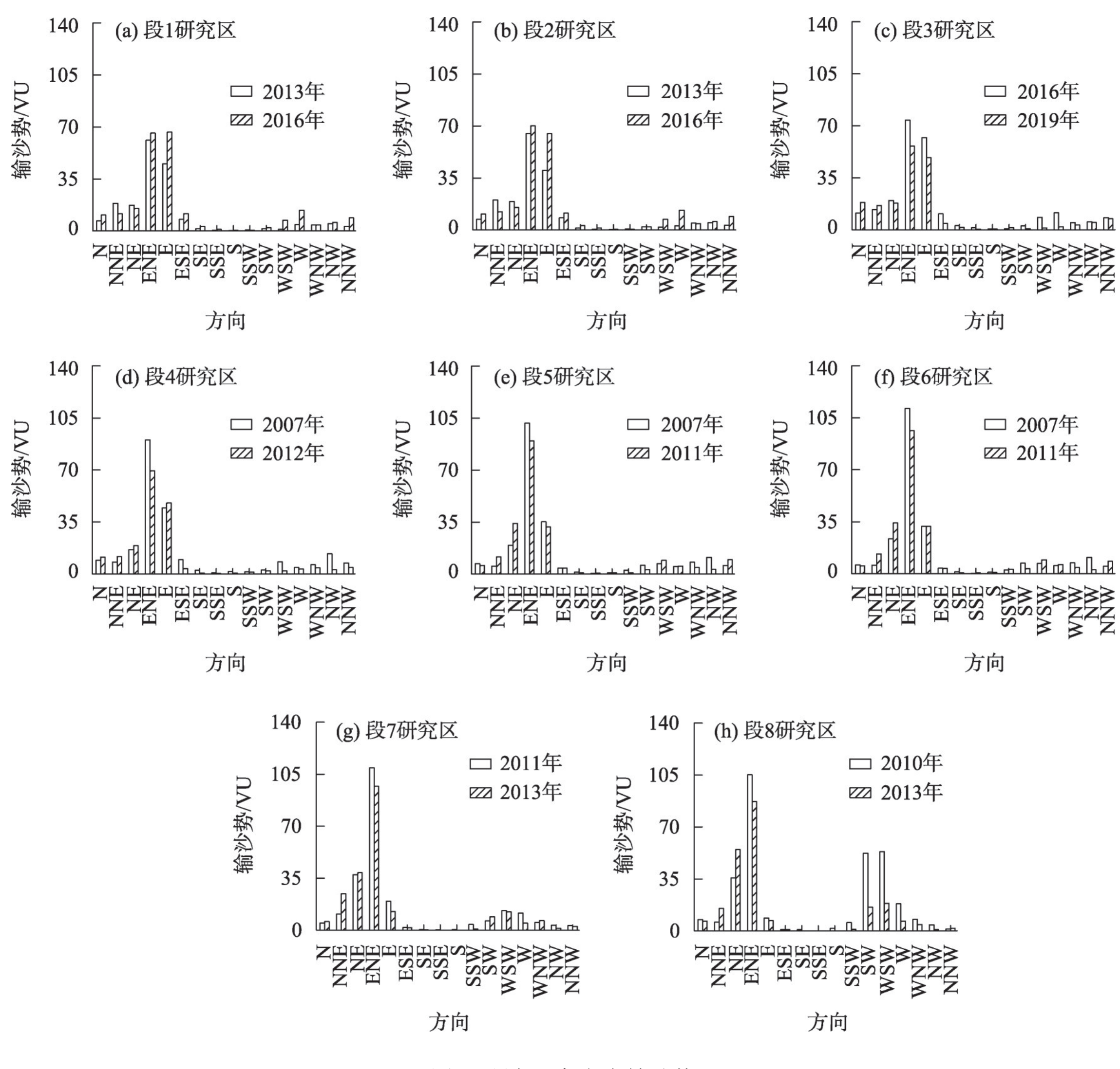


图5 研究区各方向输沙势

Fig. 5 Drift potential in each direction in the study area

表2 各研究区 *DP*、*RDP*、*RDD*、*RDP*/*DP*

Tab. 2 *DP*, *RDP*, *RDD*, *RDP*/*DP* by study area

研究区	年份	*DP*/VU	*RDP*/VU	RDD/(°)	*RDP*/*DP*	研究区	年份	*DP*/VU	*RDP*/VU	RDD/(°)	*RDP*/*DP*
段1	2013	178.23	129.37	242	0.73	段5	2007	220.96	136.66	240	0.62
	2016	228.63	135.51	245	0.59		2011	215.03	143.86	238	0.67
段2	2013	182.06	131.50	241	0.72	段6	2007	230.30	143.06	240	0.62
	2016	231.45	138.67	244	0.60		2011	224.00	149.04	238	0.67
段3	2016	236.82	144.83	243	0.61	段7	2011	230.89	137.67	237	0.60
	2019	185.85	133.51	236	0.72		2013	217.03	139.33	232	0.64
段4	2007	225.52	138.70	241	0.62	段8	2010	309.43	26.35	221	0.09
	2012	183.24	135.12	242	0.74		2013	220.82	119.57	230	0.54

型纵向沙垄和复合型横向沙丘链，垄体和链体上多分布次级沙丘，沙丘高度在3~20 m之间，且存在高度小于3 m的小型沙丘，小型沙丘移动速度更快，更容易对沙漠公路产生较大影响[21]，本文以次级沙丘和小型沙丘的移动速度、方向来表征研究区内沙丘移动规律，研究区内沙丘年平均移动速度介于3.16~6.26 m·a^{-1}，移动方向介于195.65°~241.51°(图6)。

段1、段2研究区内沙丘年平均移动速度分别为4.09 m·a^{-1}和5.47 m·a^{-1}，平均移动方向相差小于2°，数据表明这2处研究区风沙环境相似，但段1研究区内沙丘形态明显大于段2研究区沙丘，沙丘形态大小与移动速度呈负相关，由此可能造成这两研究区内沙丘移动速度的差异；段3~段6研究区RDP/DP属中等变率，说明此段研究区风向较稳定，但沙丘移动方向却出现较大波动，与整体表现出较大差异(图6)，且沙丘移动速度也出现小幅降低；图5表明，段3~段6研究区内输沙主导方向由ENE、E方向逐渐变为单一的ENE方向，且ENE方向的输沙活动强度不断增大，此段研究区内沙丘移动方向应该与*RDD*一致，但遥感影像显示，段3~段6研究区内沙丘错乱复杂、类型多样，由此可能造成沙丘移动规律的差异性，说明此段研究区内存在其他因素影响着沙丘的移动方向和速度；段7研究区内的沙丘年平均移动速度达到了6.26 m·a^{-1}，在此研究区内，各方向起沙风频率和*DP*都以ENE为主导，风沙活动强烈，沙丘移动方向与*RDD*高度同步，在公路修建和养护过程中，上风侧必然遭受严重沙害，在考虑防护宽度的同时，还要注意沙障材料的抗破损能力；段8研究区内风向紊乱且风力强劲，逆主风向起沙风的作用导致该研究区沙丘移动速度最小，但下风侧沙丘极易逆向移动掩埋路面。

3 公路沙害防治体系框架

风作为动力因素对沙丘移动产生巨大影响，研究结果表明，8段研究区内的风沙环境各异，整体来

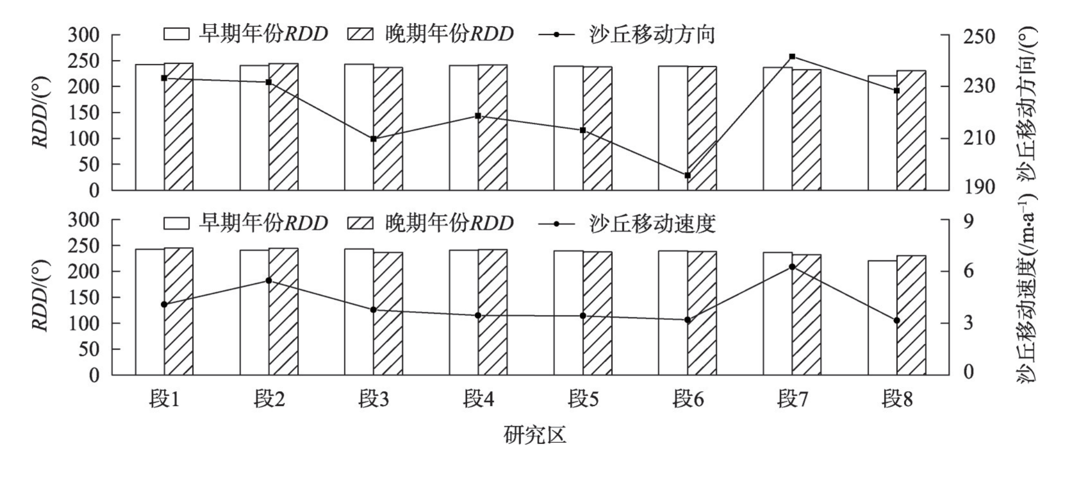


图6 沙丘移动信息

Fig. 6 Information of dunes movement

看，段1~段8起沙风频率稳步上升，数据表明，塔中–38团地区风沙环境逐步恶劣，越靠近38团地区，沙丘移动方向、速度的规律性越弱，沙丘掩埋路面的动力条件越来越充分，因此公路的防沙措施应根据监测数据因地制宜合理设置。植物防治能从根本上解决风沙灾害问题[22–23]，条件允许情况下可优先采用植物防沙，但植物防沙产生效果的周期较长，因此该公路防沙措施主要以机械防治为主，并形成防沙体系，避免单一防治措施的快速失效。鉴于此，防沙体系采用高立式沙障与固沙方格相结合，防沙体系远端垂直主风向设置高立式芦苇网格降低风速、沉积沙粒，高立式沙障作用范围在障前3.5 H(H为沙障的高度)和障后17 H内[24]，使用寿命约8 a；当风沙超出沙障的作用范围后，配合设置的固沙单元，固沙方格通过增大地表粗糙度实现固沙；采用土工网和芦苇2种材料制作阻沙方格，土工网的使用寿命长于芦苇，两者搭配使用将延长阻沙单元的作用周期。高立式沙障网格长、宽、高规格为10 m、5 m、0.8 m，宽边平行于公路设置，固沙方格规格0.2 m×1 m×1 m[25–26]，结合前人理论基础研究设置防治宽度[27]。

段1、段2、段7研究区内主导风向为ENE，沙丘移动速度分别为4.09 m·a^{-1}、5.49 m·a^{-1}和6.26 m·a^{-1}，在上下风侧防沙体系的远端各设置30 m和20 m宽度高立式芦苇沙障网格，沙障间距过小防护效果达不到最优化，间距过大达不到防护效果。段3~段6、段8研究区风环境为高频大风，且NW方向起沙风对沙丘移动产生较大影响，移动速度分别为3.78 m·a^{-1}、3.44 m·a^{-1}、3.13 m·a^{-1}、3.23 m·a^{-1}和3.16 m·a^{-1}，增加下风侧的防治宽度以防沙逆向移动掩埋路面，上下风侧各设置30 m宽高立式沙障网格。固沙单元与阻沙单元的间隔应保证在最后一道阻沙单元的作用范围内，在与高立式沙障间隔12 m(15 H)处向道路方向设置固沙方格。芦苇方格的失效年限一般为4 a，土工网方格相对芦苇方格失效时间更长，在公路上风侧设置90 m(1 m×1 m)宽度固沙方格[28]，外围为50 m宽度土工网方格，道路一侧设置40 m宽芦苇草方格；下风侧固沙方格设置40 m，2种材料的方格各20 m，土工网方格依旧设置在外围；防护体系的整体宽度应由沙丘移动速度和公路不进行大修的年份综合考虑，公路设计资料要求12 a内不进行大修，则防护体系最低宽度为12×沙丘移动速度[29]。按照图7所示，综合上述各防沙措施的宽度，在每段研究区内进行相应的防沙措施布置，形成防沙体系，为避免偶然火灾事件的发生，各类型沙障横向每隔500 m设置1 m间隔的防火带。

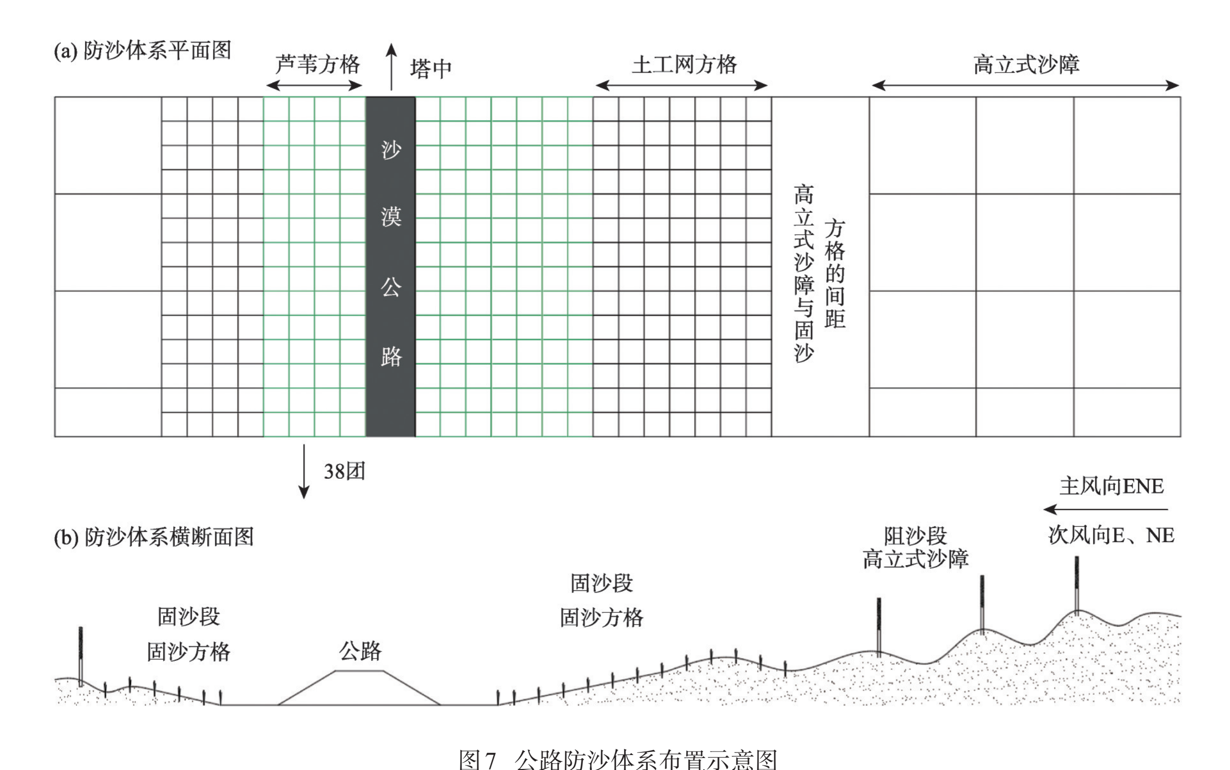


图7　公路防沙体系布置示意图

Fig. 7　Sand control system layout diagram of highway

4 结 论

（1）塔中-38团沙漠公路沿线研究区盛行起沙风方向为ENE、NE和E，频率分别介于7.5%~14.29%、2.62%~8.37%、1.7%~5.83%之间，塔中-38团年起沙风频率逐步增大，风向特征由锐双峰态势发展为钝双峰态势。塔中-38团沙漠公路沿线研究区存在低、中2种风能环境，各方向*DP*存在明显差异，其变化趋势与起沙风频率有良好的一致性；段1~段8研究区*RDP*/*DP*在0.54~0.74之间，为中等风向变率，段8研究区2010年的风向变率仅为0.09，风向极易变化。

（2）塔中-38团沙漠公路沿线研究区沙丘平均移动方向为195.65°~241.51°，年平均移动速度在3.16~6.26 m·a^{-1}之间，沙丘移动速度和方向存在明显时空差异。

（3）在塔中-38团沙漠公路沿线采用阻-固结合的防沙体系，段1、段2、段7研究区沙丘年平均移动速度大，风向变化弱，加强上风侧的风沙防治，相对于沿线其余区段，应加宽段1、段2、段7研究区上风侧高立式沙障的宽度；段3~段6、段8研究区沙丘年平均移动速度较小，但风力强劲，风向易变化，应加宽下风侧高立式沙障宽度，防止沙丘逆向移动。

参考文献(References)：

[1] 周成龙, 杨兴华, 钟昕洁, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘天气特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 324-329. [Zhou Chenglong, Yang Xinghua, Zhong Xinjie, et al. Dust weather in hinterland of the Taklamakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 324-329.]

[2] 周成龙, 杨兴华, 刘厚勇, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区的风动力环境[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 218-222. [Zhou Chenglong, Yang Xinghua, Liu Houyong, et al. Wind power environment of tazhong area in hinterland of Taklimakan Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(3): 218-222.]

[3] 陈柏羽, 程建军, 李生宇. 新疆S214省道高立式芦苇沙障合理间距分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 782-789. [Chen Boyu, Cheng Jianjun, Li Shengyu. Reasonable spacing of high-parallel reed sand barriers along the Xinjiang S214 provincial highway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 782-789.]

[4] 于涛, 李荫堂, 郭毅, 等. 悬移层风沙运动数值模拟[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 347-351. [Yu Tao, Li Yintang, Guo Yi, et al. Numerical simulation of aeolian sand movement in suspended region [J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 347-351.]

[5] Kilibarda Z, Kilibarda V. Seasonal geomorphic processes and rates of sand movement at Mount Baldy dune in Indiana, USA[J]. Aeolian Research, 2016, 23: doi: 10.1016/j.aeolia.2016.10.004.

[6] 杨军怀, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 库鲁克沙漠风沙地貌与沙丘移动[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 1-8. [Yang Junhuai, Dong Zhibao, Liu Zhengyao, et al. Aeolian geomorphology and dune migration in the Quruq Desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 1-8.]

[7] 董治宝, 陈广庭, 颜长珍, 等. 塔里木沙漠石油公路沿线沙丘移动规律[J]. 中国沙漠, 1998, 18(4): 34-39. [Dong Zhibao, Chen Guangting, Yan Changzhen, et al. The sand dune movement along the Tarim Desert oil transportation highway[J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(4): 34-39.]

[8] 邹桂香, 高宏智, 边庆策, 等. 沙丘移动速度的观测与计算[J]. 干旱区资源与环境, 1988, 2(3): 36-42. [Zou Guixiang, Gao Hongzhi, Bian Qingce, et al. Measurement and computation of desert dune movement speed[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1988, 2(3): 36-42.]

[9] Yang Junhuai, Dong Zhibao, Liu Zhengyao, et al. Migration of barchan dunes in the western Quruq Desert, northwestern China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(10): doi: 10.1002/esp.4629.

[10] Mutiry M, Hermas E, Ghamdi K, et al. Estimation of dune migration rates north Riyadh City, KSA, using SPOT 4 panchromatic images[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 124: doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.034.

[11] 俎瑞平, 张克存, 屈建军, 等. 塔克拉玛干沙漠风况特征研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 167-170. [Zu Ruiping, Zhang Kecun, Qu Jianjun, et al. Study on wind regime characteristics in the Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(2): 167-170.]

[12] 安志山, 史博源, 谭立海, 等. 玛曲高寒草甸风沙环境与沙化类型研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1058-1064. [An Zhishan, Shi Boyuan, Tan Lihai, et al. Sand environment and type during sandy desertification of an alpine meadow[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1058-1064.]

[13] 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 蒙古高原交通干线风沙(雪)危害防治技术方案[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1760-1770. [Li Shengyu, Fan Jinglong, Wang Haifeng, et al. Ecological restoration and control technology schemes for hazards of windblown sand and snow along primary communication lines in the Mongolian Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1760-1770.]

[14] Dong Zhibao, Chen Guangting, He Xingdong, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 57(3): doi:10.1016/j.jaridenv.2002.02.001.

[15] 常方乐, 康孟珍, 王秀娟, 等. 平行智能风沙防治系统构架与功能——以植物措施为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1576-1583. [Chang Fangle, Kang Mengzhen, Wang Xiujuan, et al. Framework and function of aeolian sand parallel prevention and control: Application of artificial intelligence technology in sand prevention and control[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1576-1583.]

[16] 蔡东旭, 李生宇, 王海峰, 等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1-11. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Aeolian hazard and comprehensive protection of S214 Highway in Taitema Playa, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 1-11.]

[17] 张克存, 安志山, 何明珠, 等. 乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 983-991. [Zhang Kecun, An Zhishan, He Mingzhu, et al. Aeolian sand environments and disaster prevention along Zhongwei section of the Wuhai-Maqin Highway[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 983-991.]

[18] 赛亚热·赛都拉, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 库姆塔格沙漠西缘风况特征及沙丘运移规律[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 62-68. [Saidoula Saiyare, Mao Donglei, Xu Jiarui, et al. Characteristics of wind conditions and dune movement rules on the west edge of Kumtag Desert, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 62-68.]

[19] 陈芳, 刘勇. 巴丹吉林沙漠典型地域沙丘多年变化的遥感动态分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 501-507. [Chen Fang, Liu Yong. Secular annual movement of sand dunes in Badain Jaran Desert based on geographic analyses of remotely sensed imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 501-507.]

[20] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[C]//Mckee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington: United States Government Printing Office, 1979: 137-169.

[21] 雷加强, 王雪芹, 王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究[J]. 干旱区研究, 2003, 20(1):1-6. [Lei Jiaqiang, Wang Xueqin, Wang De. The formation of the blown sand disaster to the tarim Desert highway, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 1-6.]

[22] 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等.中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 665-674. [Li Shengyu, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, et al. Patterns of blown-sand hazard control for traffic arteries in China and its application[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 665-674.]

[23] 谢胜波, 屈建军, 赖远明, 等. 拉日铁路沙害成因、分布、特征及防治研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 170-175. [Xie Shengbo, Qu Jianjun, Lai Yuanming, et al. The causes, distributions, characteristics of sand hazards and its controls for Lhasa-Shigatse Railway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 170-175.]

[24] 丁录胜, 程建军, 陈柏羽, 等. 铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 156-162. [Ding Lusheng, Cheng Jianjun, Chen Boyu, et al. Field test and numerical simulation of windbreak and sand-resisting on high-parallel reed sand-barriers along railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 156-162.]

[25] 韩致文, 刘贤万, 姚正义, 等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立式方格沙障防沙机理风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 41-45. [Han Zhiwen, Liu Xianwan, Yao Zhengyi, et al. Wind tunnel test on sand preventing mechanism of double-filmed sand bag obstacle and upright checkerboard sand-barrier[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 41-45.]

[26] 朱震达. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 56-59. [Zhu Zhenda. Aeolian Geomorphology of Taklimakan Desert[M]. Beijing: Science Press, 1981: 56-59.]

[27] 顿耀权, 屈建军, 康文岩, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 66-74. [Dun Yaoquan, Qu Jianjun, Kang Wenyan, et al. Progress and prospect of research on the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 66-74.]

[28] 徐峻龄, 裴章勤, 王仁化. 半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨[J]. 中国沙漠, 1982, 2(3): 20-27. [Xu Junling, Pei Zhangqin, Wang Renhua. A research on the width of the protection belt of half-hidden straw checkerboard barriers[J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(3): 20-27.]

[29] 胡孟春, 屈建军, 赵爱国, 等. 沙坡头铁路防护体系防护效益系统仿真研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(2): 140-147. [Hu Mengchun, Qu Jianjun, Zhao Aiguo, et al. System simulation on efficiency of railway protection system in Shapotou[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(2): 140-147.]

Transport law and control system of wind-blown sand along the desert highway of South Xinjiang Tazhong−38th Corp

MA Benteng[1], CHENG Jianjun[1], LEI Jiaqiang[2], DING Bosong[1], GAO Li[1], An Yuanfeng[1], ZHENG Zhipeng[1]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The Tazhong−38th Corp Desert Highway, currently under construction, extends from the hinterland of Taklamakan Desert to its southeastern edge. Different degrees of wind and sand hazards are distributed along the whole route, posing serious threats to the construction, service, and maintenance of the desert highway. Based on remote sensing image interpretation and wind data analysis, the wind and sand environment characteristics and dune movement rules in different sections of the desert highway were assessed, and a corresponding sand hazard prevention system framework is proposed. Our analysis showed that the prevailing wind directions along the desert highway are NE, ENE, and E, and the frequency of sandy wind increases from 21.7% to 33.8%. The wind direction characteristic develops from sharp bimodal to blunt bimodal, and the wind and sand hazards gradually become more severe: the drift potential along the section ranges from 178.23 to 309.43 VU, the wind energy environment is low to medium, the resultant drift direction is between SW-WSW, and the wind direction variation rate is medium. The annual average dune movement speed is between 3.16 and 6.26 $m \cdot a^{-1}$, and there are obvious spatial differences in dune movement speed and direction. The consistency between dune movement direction and the resultant drift direction is poor in some sections. Based on the above environmental characteristics of the desert highway sections, a sand control system for the desert highway, combining blocking and solidification, is proposed. The results of our study have practical application value in the development of prevention and mitigation measures for desert highway sand damage.

Keywords: desert highway; sand damage management; drift potential; dunes movement